ARL AKADEMIE FÜR RAUMENTWICKLUNG IN DER LEIBNIZ-GEMEINSCHAFT

Beckmann, Klaus J.:

Automatisierter Verkehr und Einsatz autonomer Fahrzeuge – (mögliche) Folgen für die Raum- und Verkehrsentwicklung

URN: urn:nbn:de:0156-0990108

CC-Lizenz: BY-ND 3.0 Deutschland

S. 244 bis 269

In:
Reutter, Ulrike; Holz-Rau, Christian; Albrecht, Janna; Hülz, Martina (Hrsg.) (2020):
Wechselwirkungen von Mobilität und Raumentwicklung im Kontext gesellschaftlichen Wandels.
Hannover = Forschungsberichte der ARL 14

Leibniz Gemeinschaft

Klaus J. Beckmann

AUTOMATISIERTER VERKEHR UND EINSATZ AUTONOMER FAHRZEUGE – (MÖGLICHE) FOLGEN FÜR DIE RAUM- UND VERKEHRSENTWICKLUNG

Gliederung

1 Was ist „automatisierter Verkehr“ – ein neuer Hype?
2 Wirkungschancen
3 Verkehrsmittelspezifische Automatisierung
4 Einsatzbereiche zwischen Quartiers- und Fernverkehr
4.1 Quartiers- und Stadtverkehr von Personen
4.2 Personenverkehr in dünn besiedelten ländlichen Räumen
4.3 Wirtschaftsverkehr in städtischen und ländlichen Räumen
4.4 Fernverkehr
5 Systemwirkungen
5.1 Nutzerakzeptanz und Nutzerverhalten
5.2 Wirkungen im Verkehr
5.3 Mutmaßliche Wirkungsbereiche
6 Auswirkungen auf Raum- und Siedlungsstrukturen
7 Fazit
Literatur

Kurzfassung
Die technologischen Entwicklungen zum (teil-)automatisierten oder sogar zum autonomen Fahren werden kaum kurzfristig in den Fahrzeugkollektiven der Privat-Pkw, der Ride- und Carsharing-Fahrzeuge, der Stadt-/Straßenbahnen sowie der Busse umgesetzt. Die Einsatzpotenziale im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) werden bislang kaum berücksichtigt. Mittel- und langfristig bedeutet der Einsatz automatisierter Fahrzeuge jedoch Veränderungen der Betriebsformen und der Nutzbarkeit – vor allem auch für die Verkehrsteilnehmer mit eingeschränkten Fähigkeiten zur selbständigen Führung von Straßenfahrzeugen. Die Fahrten können durch andere Aktivitäten der Unterhaltung, des Lesens, des Arbeitens, aber auch des Konsums genutzt werden. Mit diesen Veränderungen der Nutzung von Fahrten und Fahrzeiten können veränderte Raumwiderstände und damit auch Veränderungen von Raumstrukturen einhergehen. Es können sich aber auch verbesserte Erschließungsmöglichkeiten durch den ÖPNV für periphere Gebiete ergeben. Insofern sind Chancen und Risiken dieser technischen Innovationen für Verkehrssysteme, Infrastrukturen und Siedlungsstrukturen in einem umfassenden Umfang abzuwägen. Nutzen liegen vor allem in Effizienzsteigerungen des Verkehrs durch geringere Flächenbeanspruchungen, durch höhere Leistungsfähigkeiten und verbesserte Verkehrssicherheit.

Der zukünftige Einsatz autonomer Fahrzeuge bedarf einer Einbindung in Gesamtverkehrssysteme und der Vermeidung kontraproduktiver Effekte wie z. B. Segmentierung von Straßenräumen durch bauliche Abgrenzung der Fahrstreifen oder Rückverlagerungen vom „Umweltverbund“ (ÖPNV, Fußwege, Fahrradfahrten) auf den motorisierten Individualverkehr.

Schlüsselwörter
Automatisierte Fahrzeuge – autonome Fahrzeuge – Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation – automatisierte Fahrzeuge im ÖPNV – Effizienz der Verkehrssysteme – Verkehrssicherheit

Automated Traffic and Autonomous Cars – (possible) Effects on the Development of Transport and Settlement

Abstract
Technical development of automated cars is increasing in a rather high speed, but the big hopes of car-manufacturers concerning the role and the effects of autonomous, in the means of “driverless” going by car will not be realized in such a short time as wished. Till now, no one really cares about bringing automation to vehicles of public transport (heavy railways, light railways, underground/tubes, street cars, busses).

In the middle and long run, the usage of automated cars and the roll-out of “autonomous driving” will lead to a strong change of traffic and transport in cities and regions concerning the operating system as well as utilization. In public traffic there might be improved possibilities to reach peripheral regions/areas. But maybe, from public transport there will be a role-back to the usage of private cars. Many efforts must be put on preserving the quality of public spaces in the means of streets and places for people living there, just walking around, and looking for leisure opportunities and so on.

The usage of autonomous cars offers possibilities in means of reducing car traffic and needs of parking lots as well as for increasing efficiency of traffic. Going by autonomous cars opportunities might be offered for eating, reading, using the smartphone, working at tablet or preparing the next business meetings for example. In street traffic it also might be very useful for participant with reduced abilities or unlabeled persons to drive vehicles like cars for their one.

Risks as well as opportunities for traffic, transport, usage of streets and cities have to be considered and calculated to give opportunities the chance to grow up. There is a strong need to prepare suitable conditions concerning regulations, design of streets, and rules for using automated cars. The expected use of autonomous cars necessarily needs the inclusion into the entirety of the traffic system as well as the avoidance of contra productive effects on traffic systems, infrastructures, and structure of settlements.

Keywords
Automated cars – autonomous driving – car-car-communication – automated vehicles – public transport – efficiency of transport systems – traffic safety

1 Was ist „automatisierter Verkehr" – ein neuer Hype?

Die wissenschaftliche Literatur und insbesondere „populäre" Veröffentlichungen zur Automatisierung des Verkehrs – bis (langfristig) hin zu einer Vollautomatisierung („autonome Fahrzeuge") – sind in der letzten Zeit ebenso vielfältig (z. B. acatech 2015; acatech 2019; Axhausen/Becker 2017; Boesch/Becker/Becker et al. 2017; Dornier Consulting 2017; Friedrich 2015; Maurer/Gerdes/Lenz et al. 2015; McKinsey 2018; Minx/Dietrich 2015; VDI 2019; Wehner 2017) wie die Hoffnungen auf wirksame Beiträge zur Lösung der Probleme des städtischen, regionalen wie auch überregionalen Verkehrs groß sind. Man könnte fast von einem „Hype" sprechen. Dieser basiert auf der Hypothese einer Lockerung schon lange wirksamer Pfadabhängigkeiten und von „Lock-in-Effekten" im Gesamtverkehrssystem. Pfadabhängigkeiten liegen beispielsweise darin, dass die Entwicklung verbrennungsmotorisch angetriebener Fahrzeuge zu immer größeren, schwereren, schneller beschleunigenden Fahrzeugen führt. „Lock-in-Effekte" können auftreten, wenn Infrastrukturen für die Versorgung von verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen (z. B. Tankstellen, Werkstätten) nur verzögert um weitere Infrastrukturen für Elektrofahrzeuge (z. B. Ladesäulen, Ladenetze) ergänzt werden.

Insgesamt zeigen auch eher technisch und technologisch orientierte Studien und Veröffentlichungen (z. B. acatech 2019; VDI 2019) zunehmend kritische Reflexionen des Einsatzes von automatisierten Fahrzeugen – z. B. im Mischverkehr von Fahrzeugen unterschiedlicher Automatisierungsgrade – und erweiterte Überlegungen zu Einsatzbereichen im inter- und multimodalen Verkehr sowie in ländlichen Räumen oder außerhalb von Hochleistungsstraßen. Allerdings fehlt bisher eine vertiefte Diskussion der Einsatzmöglichkeiten im schienengebundenen wie auch im straßengebundenen öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV).

Automatisierung im Verkehr betrifft die Aufgabenerfüllung und Leistungserbringung der einzelnen Verkehrsmittel wie auch insbesondere die Interaktionen der Verkehrsteilnehmer untereinander – Fußgänger, Fahrradfahrer, Personen(kraft)wagen, Lastkraftwagen, Busse, schienengebundene öffentliche Verkehrsmittel, möglicherweise auch nahraumbezogene Luftverkehrsmittel („Drohnen") oder selbstfahrende Paket-/Lieferboxen – und mit den Anlagen im öffentlichen Raum (vgl. dazu auch Minx/Dietrich 2015; Wachenfeld/Winner/Gerdes et al. 2015; Maurer/Gerdes/Lenz et al. 2015; Heymann/Meister 2017; Beckmann/Sammer 2016; VDV 2015, vgl. auch Reutter/Wittowsky 2020 in diesem Band).

Bei der Automatisierung werden zum einen mechanische, physikalische und chemische Prozesse in Fahrzeugen elektronisch gesteuert und geregelt (so bei Motorsteuerung und Antriebssystemen, Bremssystemen (ABS) oder ESB-Systemen), zum anderen werden Bewegungsvorgänge von Verkehrsmitteln auf der Grundlage von durch Sensoren (Radar, Lidar, Infrarot, Laser, Ultraschall, Video etc.) erfassten und interpre-

tierten Informationen über Verkehrsanlagen und Verkehrszustände gesteuert. Dies gilt insbesondere für die Steuerung von Bewegungs- und Fahrvorgängen der Fahrzeuge durch Bremsassistenten, Spurhaltungsassistenten, Parkassistenten, Tempomaten und Abstandsassistenten. Diese Steuerungsprozesse sichern letztlich unfallreduzierte und regelkonforme Bewegungsvorgänge. Dazu können Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikationen „vehicle-to-vehicle" (V2V) und Kommunikationsvorgänge mit Infrastrukturanlagen sowie dem Umfeld (V2I, V2X) – beispielsweise durch Erfassung von dauerhaften oder zeitabhängigen Verkehrsregelungen wie Geschwindigkeitsbeschränkungen – und auch Kommunikationsvorgänge mit deren Steuerungsanlagen dienen. Derartige Steuerungsanlagen sind Signalanlagen und deren aktuelle Regelungsinformationen über den Freigabestatus von Fahrtrichtungen sowie über den für die Annäherung prognostizierten Zustand zur Ermöglichung eines vorausschauenden Fahrens. Es handelt sich also um stationäre sowie zeit- und situationsabhängige Informationen über Anlagen und deren Betrieb – Letztere in „Echtzeit". Hier bestehen bisher erhebliche Zweifel, ob alle Verkehrsmittel so valide erfasst werden können, dass Unfälle vermieden werden. Dies gilt insbesondere für Fahrradfahrer und Fußgänger, die unterschiedliche Kollektive aufweisen können – nach Geschwindigkeiten, Wegeverläufen, Körpergröße, Beladung u. ä. (vgl. Laker 2017). Auch noch langfristig existierende Mischverkehre aus vollautomatisierten, teilautomatisierten und nicht automatisierten Fahrzeugen stellen besonders hohe Anforderungen an Detektionstechniken sowie an Steuerungsverfahren.

Vehicle-to-vehicle-Kommunikation (V2V) kann Fahrzeuginteraktionen automatisiert ermöglichen, wie Annäherung und Abstandshaltung, Bremsvorgänge, Beschleunigung, Überhol- und Kreuzungsvorgänge.

Die Automatisierung hat im Fahrzeug bislang für den Fahrzeuglenker zumeist unterstützende und/oder zum Teil ersetzende Funktionen. Im Verkehrsablauf und Verkehrsfluss handelt es sich bisher überwiegend um „informierende", „unterstützende" und nur im geringen Maße um „ersetzende" Funktionen (vgl. Wachenfeld/Winner 2015; Wagner 2015; Friedrich 2015; Flämig 2015). Es kann daher nur von einer Teilautomatisierung gesprochen werden, keineswegs von einer Vollautomatisierung oder gar von „führerlosen/fahrerfreien" „autonomen Fahrzeugen" (Abb. 1).

Die Stufen 0 bis 2 sind voraussichtlich kurzfristig relativ umfassend erreichbar und marktwirksam, zum Teil sind sie das schon – zumindest bei höherwertigeren Fahrzeugen. Dies gilt nicht oder stark verzögert für die Stufen 3 bis 5, für die erst Rahmenbedingungen des Haftungsrechts und des Straßenverkehrsrechts grundlegend angepasst werden müssen. Die nachfolgenden Diskussionen beziehen sich vor allem auf die Stufen 4 und 5.

Insgesamt werden als Folge der Automatisierung vor allem Vorteile unterstellt bezüglich der Verkehrssicherheit, der Leistungsfähigkeit der Verkehrsanlagen, der Bequemlichkeit der Nutzung, der Flexibilität des Einsatzes, der Reduktion von Kosten usw.

Eine besondere Bedeutung haben diese Effekte auch für den Güterverkehr, beispielsweise auf Autobahnen durch Einsatz der „elektronischen Deichsel" für „Lkw-Züge". Derartige Entwicklungstendenzen können zu Effizienzsteigerungen sowie Kostenre-

duktionen und damit auch zu Verlagerungen zum Straßenverkehr führen, dessen Fahrzeuge zum Teil verbrennungsmotorisch, zum Teil elektrisch angetrieben werden und mit entsprechenden Ressourcenverbräuchen sowie Emissionen verbunden sind (CO_2, NO_x).

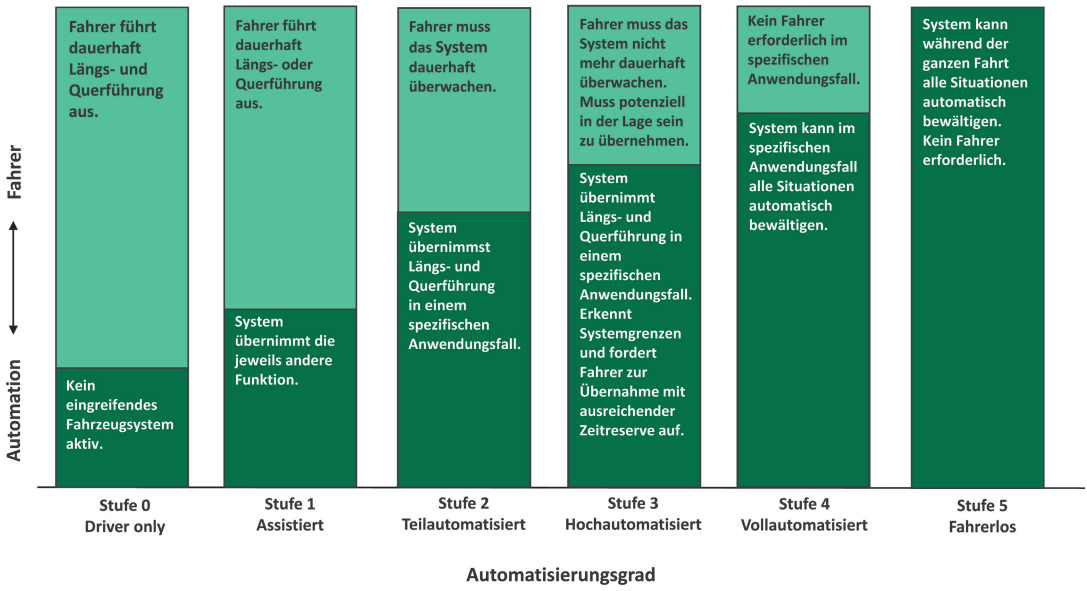

Abb. 1: Stufen der Automatisierung / Quelle: acatech 2015

Es handelt sich bei der Vollautomatisierung insofern um eine „disruptive Technik", als sich die Bezüge zwischen Fahrer, Fahrzeug und Fahrweg, aber auch Fahrgast/Transportgut grundsätzlich verändern (können). Die Entwicklung muss und wird aber gleichzeitig „evolutionär" sein, weil

1. die Fahrzeugkollektive nur schrittweise ausgetauscht werden – z. B. Pkw alle 10 bis 15 Jahre, Busse und Lkw alle 7 bis 10 Jahre, Straßenbahnen oder (U-Bahn-/S-Bahn-)Züge alle 30–40 Jahre,

2. Fahrwege alle 20–50 Jahre einer grundsätzlichen Erneuerung bedürfen und sich damit kostengünstige sowie effiziente Optionen für Umgestaltungen ergeben,

3. die Vollautomatisierung nicht in einem Schritt, sondern in einer Abfolge zunehmend erweiterter Fahrerassistenz-Systeme erfolgen wird,

4. private wie auch berufliche Fahrzeuglenker ihre (habitualisierten) Mobilitäts- und Handhabungsroutinen von Fahrzeugen nur schrittweise bei tatsächlichen oder vermeintlichen Vorteilen neuer Angebote und positiver Nutzen-Kosten-Beziehungen umstellen.

Die fachlichen, fachpolitischen und gesellschaftlichen Diskussionen sind bisher vor allem „technologisch" getrieben, auch wenn Reflexionen der Nutzerakzeptanz, der spezifischen Einsatzbereiche in Teilräumen – z. B. in ländlichen Räumen – oder auch der Integration „autonomer Shuttle" in den öffentlichen Personennahverkehr eine zunehmende Rolle spielen (vgl. acatech 2019; VDI 2019). Auch eine Einbindung in Ziele der Stadtentwicklung, der Erweiterung von Teilnahmemöglichkeiten der Bewohner aus Stadt und Region sowie der Stadtraumqualitäten finden zumindest Erwähnung.

Technische Voraussetzungen und deren Folgen

Die Entwicklung automatisierter – oder sogar in der Endphase autonomer – Fahrzeuge setzt voraus, dass die „Detektions-/Wahrnehmungsfähigkeiten" (Infrarot, Ultraschall, Radar, Lidar, Bilderfassung, Video-Scanner etc.) und die „Intelligenz" (Auswertung/Bild-/Signalinterpretation, Bewertung, Entscheidungslogiken etc.) entweder fahrzeugseitig oder infrastrukturseitig oder ggf. beidseitig in Echtzeit gekoppelt verfügbar sind. Vorhandene Einrichtungen und Verkehrsanlagen (Detektionsschleifen, Signalanlagen, Detektions- und Leiteinrichtungen in Parkhäusern, Verkehrsinformations- und Lenkungssysteme) können zur Zustandserfassung und zur Verknüpfung von Daten zumindest teilweise genutzt werden. Sie können zudem System- und Umfeldinformationen – beispielsweise zu Gesamtverkehrszuständen – erzeugen und gleichermaßen bereitstellen, um eine vorausschauende Einbindung zu ermöglichen. Dies bietet gleichzeitig die Grundlage zur rückkoppelnden Informationsbereitstellung für andere Verkehrsteilnehmer (vgl. Färber 2015; Dietmayer 2015; Wachenfeld/Winner 2015; Wachenfeld/Winner/Gerdes et al. 2015; Rannenberg 2015).

Die Nutzungskonstellationen wie auch die Konstellationen zwischen den verschiedenen städtischen oder auch regionalen Verkehrsmitteln können sich insbesondere mit Einführung vollautomatisierter Fahrzeuge erheblich – allerdings in Teilräumen unterschiedlich – verschieben. Diese Effekte treten nicht – oder nur stark reduziert – bei Stufen der Teilautomatisierung auf. Der im Prinzip hinsichtlich Verfügbarkeiten, Flächenbeanspruchungen, Ressourcenbeanspruchungen, Umweltbelastungen oder auch Nebeneffekten wie Gesundheitsförderung (Fußwege, Fahrradfahrten etc.) in Städten vorteilhafte „Umweltverbund" kann in eine veränderte Konkurrenzsituation dadurch geraten, dass möglicherweise

> Wege nichtmotorisierter Verkehrsteilnehmer (insbesondere Kinder, Jugendliche, ältere Menschen) vom Fuß- und Fahrradverkehr auf autonome (Sharing-)Fahrzeuge verlagert werden (steigende Emission, entfallende gesundheitsfördernde Bewegung, Flächenkonkurrenz um knappe Flächen im Nahraum),

> Fahrten mit dem ÖPNV auf „viele" kleinere „autonome" Fahrzeuge verlagert werden – vor allem in Sharing-Systemen oder teil-öffentlichen Systemen (als Teilsysteme des ÖPNV),

> im ÖPNV verstärkt „bedarfsangepasste" automatisierte Fahrzeuge unterschiedlicher Größe eingesetzt werden,

> unter veränderten Kosten- und Aufwandsrelationen zwischen einem taxiähnlichen öffentlichen Verkehr und dem privaten Pkw der Erstgenannte an Attraktivität verliert.

Die Automatisierung von Verkehrsangeboten und Verkehrsabläufen bedeutet somit eine Veränderung der Systemmerkmale des Verkehrs im jeweiligen Betrachtungsbereich für einzelne Verkehrsmittel wie auch für das Gesamtverkehrssystem verschiedener Bezugsräume (Quartier, Stadt, Region, überregional). So können sich veränderte Anforderungen, Qualitäten und Nutzen ergeben – beispielsweise durch eine Reduktion physischer und psychischer Belastungen der Fahrzeuglenker, durch veränderte Nutzungsmöglichkeiten der Fahrzeiten (z.B. durch Lesen, Kommunikation, Telekommunikation/Mobilfunk, Internet-Nutzung, Arbeit, Essen), aber auch durch die Veränderung von Unfallrisiken, Unfallarten und Unfallfolgen sowie durch veränderte Flächeninanspruchnahmen und Verkehrsemissionen (Lärm, Schadstoffe/Schadgase). Es handelt sich damit – wie erwähnt – um eine mittlere Position zwischen evolutionärer und strukturell-revolutionärer Weiterentwicklung von Verkehrssystemen.

Automatisierung hat somit direkte wie auch indirekte Wirkungen auf

> die Unterschiede in der Attraktivität („Nutzen“) einzelner Verkehrsmittel

> Führerscheinerwerb

> Verkehrsmittelbesitz

> Muster physischer Erreichbarkeit

> private Kostenstrukturen der Nutzung von Privatfahrzeugen, Sharing-/Leihfahrzeugen und/oder öffentlichen Verkehrsmitteln

> Kostenstrukturen der Bereitstellung von Verkehrsangeboten für Aufgabenträger infolge von Infrastrukturen, Ausstattungskosten von Infrastruktursystemen, Kosten der Bereitstellung von Informations- und Transportdiensten sowie Personalkosten

Die Diffusion (voll-)automatisierter Fahrzeuge ist abhängig von der Lebensdauer der bisher dominierenden fahrergelenkten Fahrzeuge sowie von den Attraktivitätsrelationen fahrergelenkter und fahrerloser Fahrzeugtypen, damit also letztlich von der Akzeptanz der fahrerlosen Fahrzeugtypen. Nach Ersteinführung bedingt dies – insbesondere bei langsamer und verzögerter Marktdurchdringung – Vorbereitungs- und Durchsetzungsphasen von voraussichtlich deutlich mehr als 20–25 Jahren. Die Mischverkehre von fahrerlosen und fahrergeführten Verkehrsmitteln stellen besondere Anforderungen dar. Zu dem Zeitablauf haben Entwickler und Anbieter von automatisierten Fahrzeugen eine deutlich optimistischere Einschätzung.

2 Wirkungschancen

Zur Beurteilung der Wirkungen und damit auch der derzeit verfolgten Förderpolitiken bedarf es einer ganzheitlichen Betrachtung des gesamten technologischen, ökonomischen, sozialen, ökologischen und räumlichen Wirkungszusammenhangs in folgenden Bereichen: Technologieentwicklung, Arbeitsmarkt-/Wirtschaftsentwicklung, Verhal-

tensweisen der Menschen – insbesondere im Mobilitätsbereich – und Transportorganisation von Gütern, Erschließung von Räumen, Sicherung von Teilhabemöglichkeiten und Daseinsvorsorge, Raumstrukturen von Städten/Regionen, Raumentwicklung, Standortaufwertungen, Flächenbeanspruchungen, Ressourceneffizienz, Energieeffizienz, Umweltbelastung (Emissionen, Immissionen), Klimaschutz, Belastung/Stützung oder Behinderung der Energiewende und vor allem Akzeptanz in der Bevölkerung.

Diese Wirkungsbereiche werden im folgenden Text nur teilweise erläutert und abgewogen. Die Diskussion beschränkt sich auf Wirkungen auf das Verkehrs- und Raumsystem (vgl. Holz-Rau/Scheiner 2020 in diesem Band).

Die Ermittlung der Wahrscheinlichkeit und der Wirkungen des Einsatzes von autonomen Fahrzeugen (vgl. Kap. 4), aber auch die Bewertung der Wirkungen des Einsatzes muss unterschiedlich erfolgen für

> Bezugsräume der Verkehrsvorgänge (Quartier, Stadtteil, Stadt, suburbaner Raum, dünn besiedelter peripherer ländlicher Raum, Region, Fernverkehr),

> Raumtypen (Metropolen, Groß-, Klein- und Mittelstädte, ländliche Räume, sonstige Gemeinden),

> Personen-, Güter- und Wirtschaftsverkehre,

> Verkehrsmittel und Verkehrsträger: Straßenverkehr, Schienenverkehr, straßengebundener öffentlicher Personennahverkehr, Taxis im Personenverkehr, Wirtschafts- und Güterverkehr.

Wachenfeld, Winner, Gerdes et al. (2015: 9 ff.) unterscheiden dazu als „typische Anwendungsfälle autonomer (Straßen-)Fahrzeuge“: „Autobahnautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer“, „Autonomes Valet-Parken“, „Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer“ und „Vehicle-on-Demand-Nutzung“. Auch der VDI (2019: 14 ff.) diskutiert Voraussetzungen und Wirkungen verschiedener Anwendungsfelder wie Automatisierte Shuttles, Fahrerlose Taxen, Automatisiertes Parken, Automatisiertes Fahren auf Autobahnen sowie Automatisierter Lieferverkehr. Dabei finden räumliche und raumstrukturelle Effekte keine oder nur eine nachgeordnete Beachtung.

Es ergeben sich jeweils unterschiedliche Einsatzchancen, unterschiedliche stützende und hemmende Faktoren sowie Anforderungen. Zu den Wirkungen auf Verkehrsmittelteilsysteme und insbesondere auf Gesamtverkehrssysteme – in Verbindung mit Raumstrukturen und Standortmustern – gibt es derzeit allerdings noch keine belastbaren empirischen Befunde, sondern allenfalls

> Mutmaßungen und Hypothesen (vgl. Beckmann/Sammer 2016; Heinrichs 2015; Heymann 2017; Wehner 2017),

> hypothesengestützte Modellierungen und Szenarien (vgl. Axhausen/Becker 2017; Friedrich/Hartl 2016).

Am ehesten sind Hypothesen für den Straßenverkehrsablauf – insbesondere auf eindeutigen Kraftverkehrsstraßen bzw. Autobahnen – nachvollziehbar durch Mikro-Simulationen des Verkehrsablaufs überprüfbar. In der Folge sind auch die Wirkungen auf Verkehrsflüsse, Leistungsfähigkeit/Kapazitäten, Unfall-/Kollisionswahrscheinlichkeiten, Energieverbräuche und Emissionsbelastungen abzuschätzen (Friedrich 2015; Friedrich/Hartl 2016). Dies gilt insbesondere, weil diese Systeme stark „regelgestützt" betrieben werden. Auch hier können aber bisher keine empirischen Belege bereitgestellt werden.

Insbesondere fehlen Befunde für Gesamtverkehrssysteme, in denen individuelle Präferenzen und Bewertungen eine hohe Bedeutung haben: Fahrzeugkauf und Technikpräferenzen, Bereitschaft des Fahrzeuglenkers zur Aufgabe der Steuerungsfunktion, Bewertung der Sekundärnutzen und des Images der Nutzung automatisierter Fahrzeuge, Akzeptanz der Produkte wie auch der Verhaltenserfahrungen (vgl. Fraedrich/Lenz 2015a; 2015b). Außerdem ergeben sich Veränderungen kollektiver Erreichbarkeitssysteme und individueller Erreichbarkeitserfahrungen bzw. -einschätzungen, die die Nutzung von Raumsystemen stark beeinflussen könnten (vgl. hierzu auch Reutter/Wittowsky 2020 in diesem Band).

Für Gesamtverkehrssysteme entstehen Vorteile daraus (vgl. Dangschat 2017: 497), dass

> die Verkehrssicherheit infolge der Verringerung menschlicher Handlungsfehler erhöht werden kann,

> Verkehrsflüsse harmonisiert und damit effizienter gestaltet werden können, sodass in Folge – vor allem bei entsprechenden zusätzlichen finanziellen Anreizen (Transportentgelte in Spitzenzeiten deutlich höher) – Verkehrsspitzen abgebaut werden können,

> Verkehrsflüsse auch unter Aspekten der Energieeffizienz und der Emissionseffizienz optimiert werden können,

> der Bedarf an Parkierungsanlagen durch verringerte Motorisierung sinken kann, Parkierungsanlagen effizienter ausgenutzt und Parksuchvorgänge reduziert werden können,

> insgesamt Fahr-/Bewegungsflächen, vor allem aber Abstellflächen stark reduziert werden können,

> aus 23-h-Stehzeugen effiziente, über sehr viel mehr Stunden eingesetzte Individualfahrzeuge werden können, was aber Ruf- und Sharing-Systeme voraussetzt,

> Ausbauzustände verringert, d.h. Verkehrsanlagen rückgebaut werden können,

> Personal- und Betriebskosten in „öffentlichen" Verkehrssystemen – z.B. durch Verzicht auf „Fahrer" – deutlich reduziert werden können,

> auch Transporte von nicht fahrfähigen Personen (z.B. Kinder, alte Menschen) automatisiert werden können,

> die „letzte Meile" der Güterlieferung – zumindest bis zur Haustür oder zu automatisierten Paketstationen – automatisiert werden kann, z.B. durch automatische Paketkarren oder durch Einsatz von Gepäckstationen.

Für Wirkungen auf Raumstrukturen und Standortmuster ist insbesondere anzunehmen, dass Bindungswirkungen von Systemgegebenheiten abnehmen können, beispielsweise

> für nichtmotorisierte Personen und Haushalte die Bindung an den ÖPNV und an nichtmotorisierte Verkehrsmittel,

> Bindungen an Standorte, die modal auch mit den Verkehrsmitteln des Umweltverbundes erreichbar sind,

> Bindungen an Standorte im „Nahraum" sowie durch

> Bindungen infolge von Zeitknappheit bei der Realisierung von Aktivitäten und Wegen durch produktive Nutzung der Transportzeiten.

Es können sich „Rebound-Effekte" modaler Art mit Rückverlagerungen vom Umweltverbund zum motorisierten Individualverkehr und mit Reduktionen von Inter- und Multimodalität der Verkehrsmittelwahl sowie mit Ausdehnung der Aktionsräume ergeben, die in Abhängigkeit von Antriebsarten und Betriebsformen der motorisierten Fahrzeuge zu vermehrten Schadstoff- und Lärmemissionen, zu steigenden CO_2-Emissionen und zu vermehrten Flächenbeanspruchungen führen können (vgl. Döring/Aigner-Walder 2020 in diesem Band).

Die Wahl von Wohnstandorten – unter Berücksichtigung der Mietkosten und/oder Erwerbskosten von Wohnungen, aber auch unter Einschluss der alltäglichen Mobilitätskosten (vgl. Büttner/Wulfhorst 2016) – kann deutlich verändert werden, wenn die Fahrzeiten in die individuelle Kostenkalkulation eingehen (können). Bei vollautomatisierten oder autonomen Systemen können die Fahrzeiten zu „produktiven Nutzungszeiten" oder zu „Freizeit- und Erholungszeiten" umgenutzt werden und damit die Widerstände gegen Entfernungen reduzieren, also individuelle Wahrnehmungen von Erreichbarkeiten verändern. Aber auch dazu fehlen bislang ausreichende empirische Befunde. Bislang gibt es allenfalls Einschätzungen – gestützt auf „stated-preference"-Analysen –, deren Ergebnisse aber erst noch validiert werden müssen (vgl. zu Wirkungszusammenhängen Dangschat 2020 und Holz-Rau/Scheiner 2020 in diesem Band).

3 Verkehrsmittelspezifische Automatisierung

Einen hohen Grad an Automatisierung ermöglichen vor allem Fahrzeuge mit geringen „Freiheitsgraden" der Bewegungen wie spurgeführte Verkehrsmittel und Fahrzeuge mit geringen Kollisionswahrscheinlichkeiten oder wegen der Beschränkung auf einen Verkehrsmitteltyp in Bewegungsräumen (z. B. Schiffsverkehr und vor allem Luftverkehr, wobei bei letzterem die Einflüsse einer steigenden Verbreitung von „Drohnen" ohne verstärkte Regelungen zur Führung (Standorte, Flächen, Höhen) derzeit nicht eingeschätzt werden können).

Geringe Freiheitsgrade weisen vor allem Schienenverkehrsmittel wie Fernzüge, Regionalzüge, S- und U-Bahnen, Stadt- und Straßenbahnen auf, da durch die Gleise die Längsbewegung – bis auf Weichenbereiche – festgelegt ist. Zum Teil werden durch „besondere Bahnkörper" Querungswahrscheinlichkeiten durch andere Verkehrsmittel/-teilnehmer unterbunden oder Querungen auf definierte Stellen (z. B. Bahnübergänge) konzentriert. Beobachtungsbereiche für konfliktfreie Bewegungsvorgänge sind auf diesen Bewegungskorridor („Fahrweg") in Bewegungsrichtung konzentriert. Zum Teil können ähnliche Merkmale von Bewegungsräumen und Bewegungsvorgängen auch auf Straßen durch privilegierte Fahrstreifen – z. B. Busspuren – bereitgestellt werden.

Im öffentlichen Personennahverkehr (Straßenbahnen, Busse, Taxis etc.) könnten mit der Automatisierung die Personalkosten als ein wesentlicher Kostenfaktor reduziert werden.

Anforderungen an eine umfassende Detektion von Anlagenmerkmalen (Straßenbreite, Straßengliederung, „ruhende" Verkehrsmittel, statische und dynamische Verkehrssteuerung wie Verkehrsschilder, Signalanlagen) wie auch von Verkehrszuständen – z. B. Bewegung von Fahrzeugen, aber auch von Fußgängern, Fahrradfahrern und sich im Straßenraum aufhaltenden und bewegenden Personen – sind insbesondere für Verkehrsanlagen (Straßen, Wege, Plätze, Kreuzungen etc.) hoch, die im Rahmen des Gemeingebrauchs durch verschiedene Verkehrsmittel/-teilnehmer genutzt werden können und nicht durch bauliche Trennungen „unüberwindbar" separiert sind. In diesen eher „städtischen Verkehrsanlagen" sind zudem die baulichen Merkmale (Spurenanzahl, Spurenbreite, Zugangsregelungen für Spuren, Einbauten, partielle Spurtrennungen) ebenso wie die Nutzungsvorgänge – Längsbewegungen, Kreuzungsbewegungen, Aufenthalt, Spiel, Konsum, Kommunikation, Stehen, Sitzen – zeit- und teilraumspezifisch sehr unterschiedlich und zudem sehr heterogen, sodass eine Automatisierung stark erschwert wird. Allerdings sind Einsatzmöglichkeiten erweitert gegeben, wenn insgesamt das Geschwindigkeitsniveau gesenkt wird („Stadtverkehrsgeschwindigkeit 30 km/h").

Es ist daher anzustreben, vor allem auch schienengebundene Verkehrsmittel in Städten und Regionen zu automatisieren. Dies kann zur Steigerung der Attraktivität des schienengebundenen ÖPNV führen und zur Begrenzung der Rückverlagerung auf den motorisierten Individualverkehr beitragen. Wegen der Produktions- und Angebotsdynamik für Pkw ist aber eine frühzeitigere und dynamischere Verbreitung für individuelle Verkehrsmittel zu erwarten.

Für Personen werden insbesondere bei Nutzung individueller Fahrzeuge die Sekundärnutzen der Fahrt durch Ermöglichung bzw. Erweiterung von Aktivitätenmöglichkeiten während der Fahrt – wie direkte Kommunikation, Telekommunikation, Arbeit, Erholung/Entspannung, Konsum – erweitert. Dies gilt nicht nur für begleitende Fahrgäste, sondern auch für die Personen mit (ehemals gegebener) Führungsverantwortung der Fahrzeuge. Damit entfallen aber – vollständig oder teilweise – Sekundärnutzen wie „Erfahren" der Handhabungskompetenz eines komplexen technischen Geräts (Fahrzeug mit Lenkung, Beschleunigung/Verzögerung, Wahrnehmung und Bewältigung von Störungen) und der Bewältigung von komplexen Fahr- und Transportaufgaben mit Zielwahl, Wahl von Verkehrsmitteln („Modal Split"), Wege-/Routenwahl.

Die Entlastung von Fahraufgaben bedeutet gleichzeitig eine Entlastung von Stress, da der Zwang zu hoher Aufmerksamkeit, zu sachangemessener – auch selektiver – Wahrnehmung, zu kognitiver Verarbeitung und zu Entscheidungen über Handlungsalternativen und deren Umsetzung/Ausführung entfällt. Damit entfällt aber auch die Befriedigung aus „erfolgreicher" Aufgabenbewältigung, d. h. die „Freude am Fahren". Die Ertrags-/Nutzenabwägung wird zum einen individuell und zum anderen situativ sehr unterschiedlich sein.

4 Einsatzbereiche zwischen Quartiers- und Fernverkehr

In den verschiedenen räumlichen Einsatzbereichen ergeben sich unterschiedliche Rahmenbedingungen und Anforderungen für einen Einsatz automatisierter Fahrzeuge.

4.1 Quartiers- und Stadtverkehr von Personen

In Wohnquartieren dominieren im Straßenraum nichtmotorisierte Verkehre, Aufenthalts- und Spielfunktionen. Diese Orte sind vor allem auch die „letzte Meile" des Wegbeginns wie des Wegendes von Personenfahrten im motorisierten Verkehr mit Parkvorgängen wie auch der Liefervorgänge – jeweils mit reduzierten Geschwindigkeiten (Tempo 30, Tempo 20). Ein Einsatz automatisierter Fahrzeuge kann die Quartiersqualitäten erhöhen, ohne Kollisionsrisiken und vor allem intensive Unfallfolgen zu erhöhen. Die Systemvorteile automatisierter Fahrzeuge sind gleichzeitig aber eher begrenzt, da die Wege ggf. auch nichtmotorisiert zurückgelegt werden könnten.

Im Spektrum der Einsatzbereiche wird das andere Extremum durch den Einsatz automatisierter Fahrzeuge auf zweibahnigen Bundesautobahnen/Kraftverkehrsstraßen abgedeckt, auf denen Verkehrsvorgänge durch Entfall von Kreuzungen, Querungen, Linksabbiegen – allerdings bei hohen Geschwindigkeiten – „vereinfacht" sind. Der Einsatz „vollautomatisierter" bzw. „autonomer" Fahrzeuge kann zur Verbesserung der Einhaltung von Verkehrsregelungen, zur Harmonisierung des Verkehrsflusses und damit zur Reduktion der Emissionen und zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit des Verkehrs beitragen. Hier ist ein hoher Nutzenzuwachs durch Entlastung der Fahrzeuglenker und durch Eröffnung von Optionen zu Zusatzaktivitäten während der Fahrt zu

erwarten. Damit verschieben sich die Qualitätsvorteile und die Attraktivität zugunsten des motorisierten Straßenverkehrs: Nutzung privater Fahrzeuge auf größere Entfernungen ohne Umsteigevorgänge, ohne fremde Mitreisende.

Der komplexeste Einsatzbereich von automatisierten Straßenfahrzeugen ist der Stadtverkehr auf Hauptverkehrs- und Verkehrsstraßen, in Innenstädten oder Stadtteilzentren, da hier alle Verkehrsmittel vertreten sind – zum Teil auch schienengebundener öffentlicher Verkehr (Stadt-, Straßenbahnen) – und die Straßen auch durch andere Nutzungsvorgänge geprägt sind: Spazierengehen, Aufenthalt, Sitzen, Gastronomie, Verkaufsstände, Queren/Mäandrieren, Wohnen, Liefervorgänge, Auslagen etc. Folge ist, dass komplexe Anlagen und komplexe Bewegungsvorgänge durch die Techniken der automatisierten Fahrzeuge beobachtet, identifiziert und bewertet werden müssen. Die Vorteile des Einsatzes automatisierter Fahrzeuge kommen vor allem zum Tragen, wenn ein klares Regelsystem und eine Kontrolle sowie Durchsetzung der Regelbefolgung (z. B. Tempo 20, Tempo 30) gegeben sind. Fehlleitend wirken dabei Darstellungen in den acatech-Veröffentlichungen (2015; 2019) mit zum Teil vertikalen Entflechtungen (Brücken, Über-/Unterführungen) für nichtmotorisierte Verkehrsmittel (Fußgänger, Fahrrad-/Pedelec-Fahrer). Hier sind Beeinträchtigungen von Stadtraumqualitäten nicht auszuschließen bzw. sogar zu befürchten. Da diese Teilräume der Stadt im Regelfall nicht dem Durchgangsverkehr dienen (sollten), sind Attraktivitätsverschiebungen zugunsten des motorisierten Straßenverkehrs nur als begrenzt wünschenswert zu betrachten. Eine Vermeidung von Parksuchvorgängen und die Optimierung der Zu-/Abwege und Zu-/Abfahrten zu/von Parkplätzen durch Einsatz von automatisierten Straßenfahrzeugen können allerdings verkehrsaufwandsmindernd wirken. Die Fahrten an sich ermöglichen jedoch vorteilhafte Sekundärnutzungen. Hier sind modale Verlagerungen nicht auszuschließen, aber eher nur begrenzt zu erwarten. Die Fahrzeiten innerhalb einer Kernstadt sind so kurz, dass die Sekundärnutzen begrenzt auftreten. Auch Verkehrsaufwandsveränderungen sind im engeren städtischen Bereich eher als gering einzuschätzen. Allerdings sind Bewegungsvorgänge in Städten nicht auf einzelne Teilräume begrenzt, sondern finden auch in verschiedenen Teilräumen statt, sodass Überlegungen zu veränderten Zugangs- und Betriebsregelungen angestellt werden müssen.

Im individuellen Verkehr sind räumliche Wirkungen am ehesten in Bezug auf den suburbanen Raum und die gesamte Region zu erwarten, da dort die Erreichbarkeiten zwar nicht verändert werden, aber die Reisezeiten für weitere Aktivitäten genutzt werden können. Die Kostenrelationen für Wohnen und Transport (insbesondere Zeit, Treibstoff) werden durch die Sekundärnutzen während der Fahrt zugunsten weiter außen liegender „Gleichgewichtspunkte der Kosten" verschoben. Dies gilt allerdings nur unter der Annahme gleicher bzw. ähnlicher „total costs of ownership" der automatisierten Privat-Pkw. Außerdem ergeben sich erweiterte Mobilitätsoptionen für Nichtmotorisierte.

Bisher fehlen allerdings empirische Untersuchungen zu Veränderungen der subjektiven Bewertung der Fahrzeit, wenn andere als die mit dem Fahren verbundene Aktivitäten ermöglicht werden. Durch die vorrangige Verbreitung solcher Angebote auch als automatisierte Taxis steigt die Attraktivität der Städte. In Erhebungen zur Wirtschaftlichkeit gibt es immer wieder Hinweise auf die Wohnstandortpräferenz für das

Umland aufgrund der Parkplatzknappheit in den Städten. Das Problem würde sich entschärfen können. Die Leute können auch dann in der Stadt wohnen bleiben, wenn sie in der Nutzung autoaffin sind. Es kommt somit nicht nur darauf an, welche Regelungen, sondern auch welche Affinitäten wir zukünftig haben. Dafür würde auch sprechen, dass km-bezogen die Kostendifferenz zwischen einem eigenen Pkw und dem dann automatisierten Taxi sinkt.

4.2 Personenverkehr in dünn besiedelten ländlichen Räumen

In dünn besiedelten – insbesondere peripher gelegenen – ländlichen Räumen kann ein öffentliches Verkehrsangebot kaum mehr organisatorisch und finanziell sichergestellt werden. Das ÖV-Angebot erfolgt allenfalls im Zusammenhang mit dem Schülerverkehr, der aber in schrumpfenden Räumen auch nur noch reduziert nachgefragt wird. Für andere Personen ohne individuelle Motorisierung – z. B. ältere Menschen, einkommensschwächere Haushalte etc. – kann damit die Teilnahme derzeit stark eingeschränkt sein, da die Wege zu Ärzten, Dienstleistungen, Bildungseinrichtungen, Versorgungsangeboten oder auch sozialen Kontakten kaum mehr möglich sind. Neben der schon bestehenden Nachbarschaftshilfe könnten autonome Kleinbusse oder autonome Taxis/Pkw („Robo-Taxis", „Robo-Kleinbusse") – eingebunden in einen leistungsstarken ÖPNV auf nachfragestärkeren Linien – eine Erreichbarkeit mit öffentlichen Verkehrsmitteln sicherstellen. Auch wenn dies zum Teil mit reduzierten Geschwindigkeiten – z. B. Tempo 30 oder 40 auf Landstraßen – erfolgen sollte, wäre damit eine Teilhabe gesichert. Diese „autonomen" Kleinbusse oder Taxis sollten bedarfsorientiert gesteuert („Anruf-Sammelbus/-Taxi") und behindertengerecht ausgestaltet werden sowie möglichst Stellplätze für Kinderwagen, Rollatoren u. ä. aufweisen, um Mobilitätseingeschränkte zu unterstützen.

Dieses Angebot kann eine Stabilisierung und Attraktivitätssteigerung peripherer Wohnstandorte in Verbindung mit raumstruktur-stabilisierenden Klein- und Mittelzentren fördern. Hierzu bedarf es einer Durchführung von Modellvorhaben, um Wirkungen und Nebenwirkungen abzuschätzen. Eine Stabilisierung peripherer Einzelstandorte wie kleine Ortsteile, Einzelgehöfte u. a. könnte allerdings hinsichtlich einer Gewährleistung gleichwertiger Lebensbedingungen auch unter Gesichtspunkten der Effizienz von weiteren Infrastrukturangeboten problematisch sein (ARL 2016).

4.3 Wirtschaftsverkehr in städtischen und ländlichen Räumen

Mit dem Anstieg von Online-Bestellungen und den damit im Zusammenhang stehenden Liefer- und Retour-Transporten nehmen die Liefervorgänge für den Endkunden zu. Sie sind aber wegen der Schwierigkeiten einer zeitlichen Koordinierung zwischen Lieferanten und Empfängern zunehmend auf („automatisierte") Paketstationen und/oder auf den Einsatz automatisierter Lieferroboter angewiesen. Derartige Paketstationen könnten somit vollautomatisiert mit „autonomen" Fahrzeugen beliefert werden, da es sich dann um bekannte Gebiete und Routen handelt. Die zunehmend elektrisch angetriebenen Fahrzeuge (s. Konzept der Deutschen Post/DHL) wären bei gebietsangepassten Fahrgeschwindigkeiten „raumverträglich".

4.4 Fernverkehr

Die Wegestrecken des Fernverkehrs auf Autobahnen, zweibahnigen Bundesstraßen und/oder Kraftverkehrsstraßen werden zwar mit deutlich höheren Geschwindigkeiten und einem hohen Lkw-Anteil befahren, haben aber im Vergleich zu Stadtstraßen weniger komplexe Verkehrssituationen. Es entfallen Verkehrsmittel des nichtmotorisierten und des öffentlichen Verkehrs sowie Aufenthalte, Nutzungen von Nebenanlagen und anliegender Bebauung, vor allem aber Querungsvorgänge, Linksabbiege- und Kreuzungsvorgänge. Damit sind notwendige Beobachtungs-, Identifikations- und Bewertungsprozesse ebenso wie Kommunikationsvorgänge („vehicle-to-infrastructure" V2I wie auch „vehicle-to-vehicle" V2V) in ihrer Komplexität reduziert.

In einer weiterentwickelten Form können insbesondere Lastkraftwagen (Lkw) automatisiert mit einer „elektronischen Deichsel" zu „Lkw-Zügen" zusammengekoppelt werden. Es wird dabei nicht im absoluten, sondern im elektronischen Bremswegabstand gefahren. Auch wenn dazu noch wichtige Fragen zu klären sind – wie z. B. Vorgänge des Aus- und Einfädelns, der Zu- und Abfahrmöglichkeiten von Autobahnen für „Einzelfahrzeuge" –, könnten mit dieser Betriebsform Fahrzeuglenker „entlastet" und die Leistungsfähigkeit der Autobahnen erhöht werden. Die Vereinbarkeit dieses Platooning-Verfahrens mit den Lenkzeitregelungen für die Fahrer ist aber nicht automatisch gegeben, sodass der Nutzen zwar grundsätzlich möglich erscheint, aber in der Praxis sehr begrenzt sein kann. Diese Betriebsform steht allerdings vor allem für den Wagenladungsverkehr in Konkurrenz zum Schienengüterverkehr und könnte zu weiteren modalen Verlagerungen auf die Straße führen, die aus Emissionsgründen und Gründen des Energieeinsatzes nicht priorisiert werden sollten. Außerdem sind kaskadenförmige Effekte der Verschlechterung des Angebots im Schienengüterverkehr nicht auszuschließen, da sich die Wirtschaftlichkeit von Zügen verschlechtern kann.

Für Fahrer „autonomer Personenkraftwagen" entfällt unter Umständen der „Fahrspaß", der durch den Nachweis der Handhabungskompetenz von Fahrzeugen, Geschwindigkeiten und komplexen Verkehrssituationen sowie der Fähigkeiten zur Festlegung von Bewegungsvorgängen entstehen kann. Andererseits werden die Fahrer entlastet und es entstehen neben dem Vorteil des „Gefahrenwerdens" vor allem Möglichkeiten zur Nutzung des privaten Raumes „Auto" durch Sekundäraktivitäten. Gleichzeitig kann – insbesondere bei langfristig vollständiger Ausstattung der Fahrzeugkollektive – die Leistungsfähigkeit der Straßen steigen (Friedrich 2015; Wagner 2015).

Insgesamt können diese Betriebsformen allerdings langfristig kontraproduktive Effekte auslösen wie

> Verlagerung vom Schienenverkehr auf die Straße,

> Abnahme der Inter- und Multimodalität im Fernverkehr.

Außerdem wird die Erreichbarkeit „ferner Standorte“ erleichtert und damit die Bereitschaft zur Raumüberwindung erhöht, was zu

> steigenden Fahrtlängen (Pendlerentfernungen usw.) und zur

> Stärkung disperser Siedlungsstrukturen und Lockerungen von an leistungsfähigen ÖV-Achsen orientierten Siedlungsformen („Transit Oriented Development“ – TOD)

führen kann.

Im Güterverkehr wird eine deutlich verbesserte Integration von Produktions- und Transportlogik im Sinne einer Effizienzsteigerung ermöglicht, wenn automatisierte Fahrzeuge nicht nur im öffentlichen Straßenraum, sondern auch auf Betriebsgrundstücken bis zur Laderampe fahren dürfen.

5 Systemwirkungen

Die Systemwirkungen im Teilsystem „Verkehr“ sind wesentlich beeinflusst von

> den Kostenstrukturen – im Vergleich zu Fahrzeugen mit konventionellen Ausstattungen und Betriebsformen,

> dem Grad der Verbreitung und Akzeptanz der Fahrzeuge mit Ausstattung zur Vollautomatisierung und der Mischung mit konventionell gesteuerten Fahrzeugen,

> dem Einsatz in Kombination mit „Sharing-Angeboten“ und/oder Elektro- bzw. Hybridantrieben.

Die VDI-Empfehlungen (2019) differenzieren die Systemwirkungen und damit die Beurteilungsaspekte hinsichtlich Technik/Technischen Bedingungen (z. B. Datenerfassung und -verarbeitung), Ergonomie (z. B. Akzeptanz), ökonomischer Effekte wie Sicherheit, Wirtschafts- und Arbeitsmarktentwicklung sowie Ressourceneinsatz, rechtlicher Rahmenbedingungen (Zulassungsbedingungen, Standardisierung) wie auch gesellschaftlicher Bedingungen.

5.1 Nutzerakzeptanz und Nutzerverhalten

Die Akzeptanz wird vermutlich – derzeit aber kaum kalkulierbar – auch beeinflusst werden durch

> die Kosten beim Erwerb und beim Betrieb automatisierter bzw. „autonomer“ Fahrzeuge,

> Diskussionen über die Datensicherheit und tatsächliche Mängel der Datenzugänglichkeit,

> Diskussionen über Daten- und Steuerungseingriffe („Hacken“) und die Glaubwürdigkeit der Abwehrmechanismen („Resilienz“),

> eine fundierte öffentliche Diskussion über die Steuerungsalgorithmen, über Wirkungen und damit auch über Einsatzgrenzen (vgl. BMVI 2017; Lin 2017; Lin 2015; Gerdes/Thornton 2015; Fraedrich/Lenz 2015a; acatech 2019; VDI 2019),

> das Auftreten/Nichtauftreten von Störungen in Teilsystemen oder im Gesamtsystem mit Folgewirkungen wie Unfälle, Funktionsbeeinträchtigungen des Gesamtverkehrssystems,

> die individuellen Ängste bezüglich individueller Steuerungsverluste und des Empfindens eines „Ausgeliefertseins“ an ein technisches System.

Voraussetzung einer hohen Glaubwürdigkeit wie auch einer belastbaren Beurteilung sind fundierte Wirkungsanalysen qualitativer Art (z. B. Sensitivitätsanalysen/-modelle), quantitativer und modellgestützter Art und vor allem auf der Grundlage von qualifizierten Pilot- bzw. Modellprojekten in „Real-Laboren“, d. h. in integrierten Umgestaltungen von Verkehrssystemen in Stadtquartieren oder in Beispielstädten.

Weitere Voraussetzungen sind auch eine umfassende Beteiligung der Gesellschaft und eine umfassende gesellschaftliche Wertediskussion. Diese Diskussionen müssen sowohl bundes- und landesweit als auch vor allem in Regionen und Städten geführt werden. Dazu sind Fachverwaltungen, Politik und insbesondere Wirtschaft und Zivilgesellschaft einzubinden, da sich Verhaltensmöglichkeiten und -anforderungen derzeit wesentlich ändern. Diese Prozesse sollten Voraussetzungen, mutmaßliche Wirkungen, aber auch Begünstigungen und Benachteiligungen verdeutlichen und damit einer Abwägung unterziehen. Die erkennbaren Implikationen des automatisierten Fahrens können zur Klärung und Festlegung notwendiger Rahmenbedingungen beitragen. Modell-/Pilotprojekte können dabei Erkenntnisse erbringen zur technischen Funktionsfähigkeit und zu Verbesserungserfordernissen, zur Akzeptanz und Nutzung, zur Bedeutung stützender Faktoren, aber auch zur Identifikation hemmender Faktoren sowie zur Veränderung von Leistungsfähigkeiten von Verkehrsteilsystemen wie auch von Emissionen/Immissionen – Letzteres insbesondere, wenn ein kombinierter Einsatz von automatisierten Fahrzeugen mit emissionsreduzierten Antrieben erfolgt (z. B. Elektroantrieb).

Diese Erkenntnisse sollten Grundlagen sein für Vereinbarungen zwischen den Beteiligten, aber auch für Kontrolle, Evaluierung und Nachjustierung von Einführungsstrategien und Einführungsschritten. Die Arbeiten der Di Fabio-Kommission (2016 im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und Digitale Infrastruktur – BMVI) erscheinen nicht hinreichend für die gesamtgesellschaftlichen wie auch lokalen Diskussionen zur Steuerung der Mobilitätswende. Die Auseinandersetzung über Ziele, Zwecke, aber auch über zu vermeidende Nebenwirkungen des Einsatzes von automatisierten Fahrzeugen muss vor allem im örtlichen Zusammenhang durch Setzung von Rahmenbedingungen

seitens Politik und Verwaltung, aber auch im nationalen Kontext der Ausgestaltung von Förderprogrammen und beispielsweise der Ausgestaltung des Verkehrsrechts erfolgen.

5.2 Wirkungen im Verkehr

Unmittelbare Wirkungen ergeben sich auf den motorisierten Straßenverkehr, da durch die Automatisierung die Folgezeitlücken im fließenden Verkehr ebenso wie die Anfahrzeitlücken an Kreuzungen – insbesondere signalisierten Kreuzungen – mindestens halbiert, oft sogar deutlich stärker reduziert werden können. Dies ermöglicht unter bestimmten Annahmen starke Kapazitätssteigerungen – z. B. für Fahrstreifen von 2.200 Pkw-E/h auf 4.100 Pkw-E/h und an Signalanlagen pro Fahrstreifen von 800 Pkw-E/h auf 1.120 Pkw-E/h (vgl. Minx/Dietrich 2015: 103 ff.; Friedrich 2015). Friedrich geht von einer zu erreichenden Kapazitätserhöhung im Stadtverkehr um 40 %, auf Autobahnabschnitten um 80 % aus. Die Ergebnisse sind letztlich abhängig von den unterstellten Kontexten der baulichen Anlagen und betrieblichen Regelungen.

Diese Potenziale der Kapazitätserhöhung tragen dazu bei, Wahrscheinlichkeiten von Staus an Engpässen zu reduzieren, damit Reisezeiten kalkulierbarer zu machen und zu verringern. Die Kapazitätserhöhungen eröffnen aber auch Umbaupotenziale von Straßen-/Verkehrsräumen zugunsten der Verkehrsmittel des Umweltverbundes und sonstiger Straßenraumnutzungen. Sie ersparen zum Teil auch Ausbaumaßnahmen von Straßeninfrastrukturen.

Wegen der zunehmenden Verbreitung hochwertiger Erfassungssysteme (Video, Infrarot, Radar, Lidar etc.) und der steigenden Leistungsfähigkeit von dezentralen Rechnern (PC, systemintegrierte Rechner etc.) kann von einer stark degressiven Kostenentwicklung automatisierter Fahrzeuge und Verkehrssysteme ausgegangen werden, sodass Mehrkosten der Automatisierung der Fahrzeuge bei der Beschaffung zukünftig nur sehr begrenzt sein werden, die Betriebskosten – bei Einsatz in Sharing-Systemen, aber auch im privaten Eigentum – vor allem infolge des Einsatzes „stadtgeeigneter" Fahrzeuge sogar deutlich geringer sein können. Dies erhöht die Beschaffungsbereitschaft – zumal Handhabung und Nutzung deutlich vereinfacht werden. Die Beschaffungsbereitschaft dürfte zudem gruppen- und kohortenabhängig sein.

Es ist zu prüfen, ob anlagenseitige Sensorik, Kommunikations- und Steuerungsanlagen zukünftig nicht durch Fahrzeugausstattungen verzichtbar sind oder als Bestandteile der öffentlichen Infrastrukturen („Straßen") zu betrachten und daher von der öffentlichen Hand zu finanzieren sind. Dies gilt auch für Nachrüstungen von existierenden Straßen und Anlagen. Eine Begründung ergäbe sich daraus, dass sie Bestandteile der Verkehrsinfrastrukturen wären. Dazu bedarf es aber einer umfassenden Abwägung der Aufwände und der Begünstigungen sowie der Finanzierungsbedingungen.

Auch wenn es wegen des Fehlens praxisorientierter und tatsächlich beobachtbarer Angebote derzeit nicht möglich ist, „revealed preferences" durch Verhaltensbeobachtungen und Identifikation von Verhaltensveränderungen zu erfassen, verbleibt als empirische Grundlage mit teil-gültigen Aussagemöglichkeiten die Erhebung von „stated

preferences“ (vgl. Bösch/Ciari/Axhausen 2015), die eine relativ große Nutzungs- und Kaufbereitschaft andeuten. Dies kann durch „ökonomische Anreize/Kaufanreize/Zuschüsse“ wie auch durch Anreize durch Privilegierungen (z.B. Parkmöglichkeiten) gestützt werden.

So können sich nach der ADAC-Studie (2016) derzeit 33% der befragten ADAC-Mitglieder eine Nutzung, 35% keine Nutzung vorstellen, während 29% unentschieden sind. Dabei erwarten 11% der Befragten den Einsatz von autonomen Fahrzeugen in den nächsten fünf Jahren, 35% in sechs bis zehn Jahren und 40% danach. McKinsey (2016) belegt, dass 81% der Befragten eine Nutzungsbereitschaft angeben, wenn sie jederzeit selbst eingreifen und steuern können. Diese Zahlen machen die Grenzen der Gültigkeit von „stated preferences“-Erhebungen deutlich. Dabei zeigt sich derzeit eine mit dem Alter sinkende Nutzungsakzeptanz. Eine Untersuchung von DEKRA zeigt eine höhere Umsetzungswahrscheinlichkeit (erwartete Verbreitung in 10 Jahren bei 8%, in 10–20 Jahren bei 26%, in mehr als 20 Jahren bei 32% der Befragten). Die IW-Studie „Autonomes Fahren – eine Herausforderung für die deutsche Autoindustrie“ (Bardt 2016) untersucht unter anderem die Zahlungsbereitschaft für automatisierte Pkw vor allem bei hoher Technikaffinität.

Die bisher fehlenden praktischen Umsetzungen sind mit einer großen Unsicherheit der genannten Nutzungswahrscheinlichkeit, Akzeptanzen und Diffusionszeiträume verbunden (Cyganski 2015).

5.3 Mutmaßliche Wirkungsbereiche

Die denkbaren Wirkungsstufen sind derzeit hinsichtlich Intensität, räumlichen Bezügen und zeitlichen Abläufen (noch) nicht umfassend und abschließend einschätzbar. Sie erstrecken sich – beruhend auf Hypothesen, Modellschätzungen und vereinzelten empirischen Befunden – von einem reinen Austausch individueller Kraftfahrzeuge im privaten Eigentum über eine Teilverlagerung von im privaten Eigentum stehenden Fahrzeugen auf Carsharing-Angebote („Teil-Substitution“) zu intermodalen Verlagerungen vom Umweltverbund auf den motorisierten Straßenverkehr (modale Rückverlagerungen als unerwünschte Rebound-Effekte). Durch die Verbesserung der Erreichbarkeiten und durch eine „Nutzen-Aufladung“ der Fahrten entstehen induktive Effekte (längere und häufigere Verkehrswege).

Werden auf der Grundlage des derzeitigen Mobilitätsverhaltens die Potenziale des vollständigen Ersatzes privater Pkw durch automatisierte Carsharing-Fahrzeuge bzw. Ridesharing-Dienste abgeschätzt, so zeigt sich, dass in Abhängigkeit von den Annahmen zu Angeboten, Angebotsqualitäten (z.B. Wartezeit auf ein Fahrzeug) sowie zur Akzeptanz die Anzahl der Fahrzeuge im Straßenverkehr von Städten auf 30% bis maximal 10% verringert werden könnte (vgl. Friedrich/Hartl 2016; Bösch/Ciari/Axhausen 2015). Ersichtlich werden die Entlastungs- bzw. Reduktionspotenziale für Anlagen und Flächen des ruhenden Verkehrs (Straßenparkplätze, Parkhäuser/Tiefgaragen, Einstellplätze auf Grundstücken). Durch die Förderung des Einsatzes von Sharing-Fahr-

zeugen bedeutet dies auch eine drastische Senkung des privaten Kraftfahrzeugbesitzes – beginnend mit dem Besitz von Dritt- und Zweitwagen, aber auch dem Gesamtbesitz privater Kraftfahrzeuge.

Sektoral konnten aber auch Taxi-Flotten durch den Einsatz von automatisierten Fahrzeugen („Roboter-Taxis") um 50–70% reduziert werden (Minx/Dietrich 2015; Pavone 2015).

Mit dem Projekt MEGAFON (Friedrich/Hartl 2016) sind für den Untersuchungsraum Stuttgart verschiedene Szenarien für die Verkehrsnachfrage, die Entwicklung des Fahrzeugbestands, die Verkehrsleistung (Fahrzeugkilometer), die erforderlichen Stellplätze sowie den Energieverbrauch erarbeitet worden. Grundlage sind die Erwartungen an eine steigende Verkehrssicherheit, an steigenden Komfort und eine hohe Leistungsfähigkeit sowie an erweiterte intermodale Mobilitätsangebote. Wechselwirkungen mit dem nichtmotorisierten Verkehr und dem Güterverkehr werden nicht berücksichtigt, jedoch mit der Nutzung von Car- und Ridesharing durch den vermehrten Einsatz automatisierter Fahrzeuge. Die innerörtlichen Geschwindigkeitsniveaus werden im Modell abgesenkt. Die Verkehrsmittelwahl wird für das jeweilige Szenario „gesetzt", wobei Busse – je nach Szenario – durch unterschiedliche Anteile des Ridesharings ersetzt werden, Privat-Pkw durch unterschiedliche Anteile von Carsharing-Fahrzeugen vollautomatisierter Art. Mit dem Anteil des Einsatzes von Sharing-Fahrzeugen steigt die Einsatzzeit von Fahrzeugen (vom „Stehzeug" zum „Fahrzeug"). Der Energieverbrauch sinkt nur bei Einsatz kleinerer Fahrzeuge und einer hohen Auslastung von Ridesharing-Fahrzeugen. Die Ergebnisse des Projekts MEGAFON zeigen, dass die Wirkungen des Einsatzes automatisierter Fahrzeuge von den gesetzten bzw. unterstellten Rahmenbedingungen stark beeinflusst werden. Gerade der Einsatz in Sharing-Flotten zeigt eine Reihe von für die Stadt- und Verkehrsentwicklung erwünschter Wirkungen – vor allem wenn kleine „Stadt-Fahrzeuge" den Hauptteil der Flotten darstellen.

Die Handlungsansätze und Strategien zur Teil- bzw. Vollautomatisierung des Schienenverkehrs und des motorisierten Straßenverkehrs im Personen- und Güterverkehr sind Beiträge zur Entwicklung und Ausgestaltung von „smart cities" und „smart regions". Letztlich muss es deren Ziel sein, die Zukunftsfähigkeit der Städte, Regionen und überörtlichen Raumstrukturen zu sichern – auch bei Dynamisierung des Städtewachstums, bei Globalisierung und Digitalisierung von Wirtschaft und Gesellschaft sowie bei steigenden Anforderungen an die Umsetzung der Energiewende und der Klimaschutzziele. Somit müssen die Strategien, Handlungskonzepte und Maßnahmen zur „Automatisierung des Verkehrs" in ihren Wirkungen – auch kontraproduktiver Art – auf eine angestrebte Mobilitäts- und Verkehrswende hin betrachtet werden (Agora Verkehrswende 2017).

Insgesamt ist erkennbar, dass die bisherigen Untersuchungen infolge des Fehlens belastbarer empirischer Grundlagen nur qualifizierende, ja sogar hypothesenhafte Aussagetendenzen haben. Viele Fragen und Effekte bleiben offen. Bei Einführungen in modalen und räumlichen Modellprojekten sind diese zu prüfen und auszudifferenzieren.

6 Auswirkungen auf Raum- und Siedlungsstrukturen

Unter der Annahme einer weitgehenden Verbreitung von automatisierten – in der Endstufe autonomen – Fahrzeugen ergeben sich veränderte

> Nutzungsoptionen von Kraftfahrzeugen auch für Nichtmotorisierte und für Personen, die keinen Führerschein besitzen,

> Optionen zum Motorisierungsverzicht von bisher Motorisierten bei verstärktem Einsatz von Carsharing-Fahrzeugen,

> Nutzungsoptionen der Fahrzeit für weitere Aktivitäten, die bisher nur – zumindest teilweise – in öffentlichen Verkehrsmitteln des Nah- und Fernverkehrs möglich waren.

Damit verschieben sich zum einen die Attraktivitätsrelationen der verschiedenen Verkehrsmittel, zum anderen die subjektiv empfundenen Zeitaufwände („Widerstände") von Fahrten/Reisen, sodass sich alltägliche Aktionsräume in Städten und Regionen, aber auch multilokale Lebensräume wie auch Fahrtziele bei beruflichen und privaten Kontakten ausweiten (können). Die gesamthaften Raumwirkungen lassen sich mithilfe integrierter Siedlungs-/Raum-Verkehrsmodelle in Form von Szenarien abschätzen (Heinrichs 2015; Minx/Dietrich 2015; Alessandrini/Campagna/Delle Site et al. 2015).

Eine weitere Entkopplung von räumlichen materiellen Strukturen und individuellem sowie kollektivem Verhalten ist – zum Teil – verkehrsaufwandfördernd.

Meyer, Becker, Bösch et al. (2017) führen eine umfassende Untersuchung zu räumlichen Wirkungen des Einsatzes von „autonomen Fahrzeugen" durch. Die erarbeiteten Untersuchungen für die Schweiz unterscheiden sich in den Annahmen zu den Einsatzbereichen „autonomer Fahrzeuge" – sei es nur zwischenörtlich oder zwischen- und innerörtlich oder Letzteres noch überlagert durch den Einsatz von Sharing-Fahrzeugen. Dabei zeigt sich, dass der Einsatz „autonomer Fahrzeuge" zu einer Verstärkung der Suburbanisierung („urban sprawl") und zu einer Schwächung der Nachfrage im öffentlichen Verkehr führen kann. Hier verdichten sich Effekte der subjektiven Beurteilungen der Zeitaufwände, wenn die Zeit für andere Aktivitäten genutzt werden kann. Dies gilt für die gesamte Schweiz mit Ausnahme der Agglomerationsräume wie Basel, Zürich, Bern und Genf. In diesen Teilräumen steigt die Nachfrage im motorisierten Straßenverkehr durch den Einsatz „autonomer Fahrzeuge" – auch für ältere Menschen und Kinder – stärker als die Kapazitätszuwächse der Straßen infolge der Automatisierung, sodass sich die Erreichbarkeiten verschlechtern. Die Ergebnistendenzen stimmen mit den Ergebnissen der anderen von Meyer, Becker, Bösch et al. (2017) referierten Untersuchungen tendenziell überein – auch wenn sich die Rahmenbedingungen der Schätzungen bzw. Szenarien zum Teil deutlich unterscheiden.

Die Untersuchungen machen die Potenziale der Verbesserung der Erreichbarkeiten für ländliche Räume ebenso deutlich wie die ambivalenten Wirkungen für Verdichtungsräume.

Dies wird auch bei Heinrichs (2015) deutlich, der ausgewählte Stadtentwicklungsszenarien („Regenerative und intelligente Stadt", „Hypermobile Stadt", „Endlose Stadt") einer qualitativen Analyse hinsichtlich der Effekte des Einsatzes von „autonomen Fahrzeugen" unterzieht und daraus das – eher überzogen wirkende – Fazit zieht: „(...) so wäre letztlich die Auflösung des Faktors Zeit als begrenzende Variable der Stadtentwicklung möglich" (ebd.: 220).

Kleinräumig, d. h. in Wohnquartieren, Stadtteilzentren oder Innenstädten, können sich durch die Verringerung bzw. den Entfall des Parksuchverkehrs verbesserte Stadt(teil)qualitäten ergeben, da öffentliche Räume durch geringere Flächenansprüche, aber auch durch optimierte Fahrvorgänge weniger belastet werden. Diese Entlastungen werden vor allem dann gewährleistet, wenn die parkenden Fahrzeuge räumlich konzentriert und effizient abgestellt werden (Parkhäuser u. ä.), sodass Straßenräume entlastet werden und disponible Flächen für andere Nutzungen zur Verfügung stehen können. Dies gilt insbesondere, wenn vollautomatisierte oder autonome Fahrzeuge in Sharing-Systemen bereitgestellt werden – sowohl standortgebunden als auch „free-floating" wie „privat organisiert" –, da dann Parkdauern und Parkflächenbedarfe sinken können. Damit kann die Attraktivität (inner-)städtischer Standorte erhöht und können Wohnnutzungen gestärkt sowie weitere Stadtnutzungen ermöglicht werden.

Gleichzeitig können bei Steigerungen der Leistungsfähigkeit der Fahrstreifen durch vollständigen oder überwiegenden Einsatz automatisierter Fahrzeuge möglicherweise Fahrstreifen für den motorisierten Verkehr in Anzahl und Spurbreite reduziert werden, sodass sie entweder privilegiert für den ÖPNV (Busse, Straßenbahnen) und/oder für andere Straßenraumnutzungen bereitgestellt werden können. Damit steigen die Möglichkeiten zur Umgestaltung und Aufwertung der Straßenräume durch zusätzliche bzw. erweiterte Nutzungsoptionen (Begrünung, Aufenthaltsflächen, Gehwegverbreiterung, Fahrradstreifen, Gastronomie/Verkaufsstände etc.). Dies ist aber abzuwägen mit erschwerten Querungsmöglichkeiten von Fahrbahnen für Fußgänger oder Fahrradfahrer.

Die genannten Wirkungen können sich nur dann entfalten, wenn die automatisierten Fahrzeuge mit höchster Regelbefolgung und mit höchster Sicherung der Schutzbelange für andere – vor allem besonders schutzwürdige – Personengruppen betrieben werden, ohne dass dazu „bauliche Trennungen" (z. B. Schutzgitter, Mäuerchen, Über- oder Unterführungen für Fußgänger und/oder Fahrradfahrer) eingesetzt werden (müssen), die eine Segmentierung der Straßenräume und deren Nutzung bedeuten würden. Vielmehr müssten im Regelfall parallel „flächendeckend" Geschwindigkeitsbeschränkungen erfolgen (Tempo 20/30/40). Unter diesen Voraussetzungen können auch bei „Störungen" (spielende Kinder, querende Personen etc.) durch geregelte Bremsvorgänge Kollisionen vermieden werden oder mit nur geringen Kollisionsfolgen verbunden sein. Für die Erreichung von Zielen wie Aufwertung von Straßenräumen als Stadt-/Lebensräume wäre eine bauliche (Ab-)Trennung von Fahrstreifen für automatisierte Fahrzeuge in hohem Maße kontraproduktiv (vgl. Dangschat 2017: 500). Es wäre ein Weg zurück zur „autogerechten Stadt" – wenngleich auch automatisiert.

Eine Vermeidung möglicher unerwünschter bzw. kontraproduktiver Effekte wie Schwächung der Innenentwicklung von Städten oder der Siedlungsentwicklung in Zentralen Orten sowie an Siedlungsachsen mit leistungsfähigen ÖV-Verkehrsmitteln ist bei gleichzeitiger Begrenzung einer weiteren Suburbanisierung sowie Schwächung der Multi- und Intermodalität des Mobilitätsverhaltens nicht leicht zu gewährleisten. Zudem kann die Wirksamkeit von Parkraumbewirtschaftungskonzepten und von Maßnahmen des Mobilitätsmanagements ebenso geschwächt werden wie die Wirksamkeit des Umweltverbunds.

Eine Vermeidung der kontraproduktiven Effekte ist nur wirksam möglich bei Einbindung der Handlungskonzepte zur Automatisierung in integrierte Verkehrs(entwicklungs)konzepte (SUMP/VEP) und integrierte Stadt-/Raumentwicklungskonzepte (INSEK) und bei Erweiterung um Steuerungskonzepte wie Parkraumbewirtschaftung, flächenhafte Geschwindigkeitsbeschränkungen oder auch Zulassungskonzepten für Fahrzeuge mit unterschiedlichen Antriebssystemen.

7 Fazit

Die Einführung automatisierter („autonomer") Fahrzeuge in den Straßen- und Schienenverkehr bedeutet nicht nur technische Innovationen, sondern erfordert auch begleitende soziale und soziotechnische Innovationen – auch in Form einer Förderung von Akzeptanz und Bereitschaft zu Verhaltensänderungen. Die Auswirkungen auf räumliche Strukturen des Verkehrs und vor allem auf Raum- und Siedlungsstrukturen stehen bisher kaum im Vordergrund der Betrachtung (vgl. Beckmann/Sammer 2016; Axhausen/Becker 2017; Meyer/Becker/Bösch et al. 2017). Die Anstöße und Potenziale zu Veränderungen von Raumstrukturen haben aber langfristig schwer korrigierbare Folgewirkungen, sodass diese frühzeitig und umfassend berücksichtigt werden sollten. Schon in der derzeitigen frühen Phase der Entwicklung und des Einsatzes automatisierter Fahrzeuge wird bestimmt, welche Folgen sich in der Raumentwicklung einstellen und stabilisieren werden.

Es zeigt sich, dass Gesamtverkehrssysteme in allen Teilräumen durch den Einsatz automatisierter Fahrzeuge erweiterte Wahlmöglichkeiten aufweisen können. Der Einsatz ist derzeit zwar nur für die (ferne) Zukunft denkbar, ein langfristiger Einsatz aber zu erwarten – auch wenn die genauen Formen noch entwickelt werden müssen.

Ein Einsatz autonomer Fahrzeuge ist sowohl für den Schienenverkehr als auch den motorisierten Straßenverkehr kaum kurzfristig, aber mittel- und vor allem langfristig zu erwarten. Zur Nutzung der erwünschten Effekte und zur Vermeidung unerwünschter Effekte bedarf es einer frühzeitigen und intensiven fachlichen, politischen und gesellschaftlichen Auseinandersetzung mithilfe fundierter Akzeptanzuntersuchungen, Einsatzszenarien, modellgestützter Wirkungsanalysen und vor allem des Einsatzes von „Realwelt-Laboren".

Schon in der derzeitigen frühen Phase der Entwicklung und des Einsatzes automatisierter Fahrzeuge wird mit beeinflusst, welche Folgen sich im Gesamtverkehrssystem und in der Raumentwicklung einstellen können. Deswegen müssen bei Entscheidun-

gen über die Förderung dieser technologischen Entwicklungen und über die Ausgestaltung von Rahmenbedingungen (Straßenverkehrsrecht) die gesamthaften Wirkungen abgeschätzt und abgewogen werden. Dies gilt auch für Anstöße zur Veränderung von Raumstrukturen und Standortmustern.

Insgesamt sollen die folgenden Aspekte in einem sicherlich sehr vorläufigen thesenhaften Fazit zusammengefasst werden.

Die Einführung von automatisierten Fahrzeugen und deren Durchsetzung im gesamten Fahrzeugkollektiv ist ein zeitaufwendiger Prozess. Wichtig sind demnach frühzeitige Realwelt-Experimente mit umfassenden Wirkungsanalysen.

Eine Beschränkung der Automatisierung auf individuelle Straßenverkehrsfahrzeuge und Lastkraftwagen ist nicht begründbar. Einsatzpotenziale und positive Wirkungen sind auch für öffentliche Verkehrsmittel anzunehmen/zu erwarten – sowohl im Schienenverkehr als auch im Straßenverkehr, gerade auch für Kleinbusse und Taxis in nachfrageschwachen Regionen.

Die Einführung von automatisierten Straßenfahrzeugen sollte möglichst mit Umstellungen von Antriebstechniken (z. B. batterie-elektrischen Antrieben) erfolgen. Die Reduktionen der CO_2-Emissionen wie auch sonstiger Umweltbelastungen (z. B. Stickoxide) müssen unabhängig gelöst werden.

Verkehrsinduzierende Effekte durch den Einsatz automatisierter Fahrzeuge können für eine nachhaltige Verkehrsentwicklung kontraproduktiv sein – sowohl im Hinblick auf CO_2-Emissionen, Energieeinsatz, Flächenbeanspruchung, Lärmimmissionen (bei Antrieben mit Verbrennungsmotoren) und Stickoxid-Emissionen als auch für eine Verstärkung der Suburbanisierung.

Durch eine Automatisierung bedingte Sicherheitsgewinne wie auch mögliche Flächenreduktionen und Erhöhungen der Kapazitäten im Parkraum oder auf Fahrbahnen sind unerwünschten Effekten wie Suburbanisierung oder Rückverlagerungen vom Umweltverbund gesamthaft abwägend gegenüberzustellen.

Dies muss bezogen auf das Gesamtverkehrssystem auf allen Ebenen von Fernverkehr, Regional- und Stadtverkehr erfolgen. Vor allem bedarf es auf lokaler Ebene einer entsprechenden Steuerung und abwägenden Ausgestaltung.

Die Risiken der Nutzung von automatisierten Fahrzeugen bezüglich Datenschutz und Datensicherheit, aber auch Unfällen sind zu ermitteln und abzuwägen. Durch klare verkehrsrechtliche Regelungen und deren Überwachung sind diese zu begrenzen.

Die Vorteile werden vor allem im Fernverkehr sichtbar werden. Aber auch für den öffentlichen Verkehr sind Nutzungspotenziale – wie erste praktische Beispiele zeigen – in dünn besiedelten Räumen zu erschließen.

Vor allem ist in den Städten darauf zu achten, dass nicht aus Gründen der Verkehrssicherheit Segmentierungen der Straßenräume und damit Beeinträchtigungen der Straßenraumqualitäten erfolgen.

Literatur

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (2015): Neue autoMobilität. Automatisierter Straßenverkehr der Zukunft. München.
acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (2019): Neue autoMobilität II. Kooperativer Straßenverkehr und intelligente Verkehrssteuerung für die Mobilität der Zukunft. München.
ADAC – Allgemeiner Deutscher Automobil-Club (2016): ADAC Mitglieder rechnen mit autonomen Fahrzeugen – Repräsentative Umfrage.
https://www.presseportal.de/pm/7849/3501403 (04.12.2016).
Agora Verkehrswende (2017): Mit der Verkehrswende die Möglichkeit von morgen sichern – Zwölf Thesen zur Verkehrswende. Berlin.
ARL – Akademie für Raumforschung und Landesplanung (Hrsg.) (2016): Daseinsvorsorge und gleichwertige Lebensverhältnisse neu denken. Perspektiven und Handlungsfelder. Hannover. = Positionspapier aus der ARL 108.
Alessandrini, A.; Campagna, A.; Delle Site, P.; Flilippi, F.; Persia, L. (2015): Automatic Vehicles and the Rethinking of Mobility and Cities. In: Transportation Research Procedia 5, 145-160.
Axhausen, K. W.; Becker, F. (2017): Predicting the Use of Automatic Vehicles. Zürich.
Bardt, H. (2016): Autonomes Fahren. Eine Herausforderung für die deutsche Autoindustrie. Köln. = IW-Trends 2.
Beckmann, K. J.; Sammer, G. (2016): Autonomes Fahren im Stadt- und Regionalverkehr – Memorandum für eine nachhaltige Mobilitätsentwicklung aus der integrierten Sicht der Verkehrswissenschaft. Berlin, Wien.
BMVI – Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.) (2017): Strategie automatisiertes und vernetztes Fahren. Berlin.
Bösch, P. M.; Becker, F.; Becker, H.; Axhausen, K. W. (2017): Cost-based Analysis of Autonomous Mobility Services. Zürich. = Institute for Transport Planning and Systems (IVT), ETH Zürich, Working Paper 1225.
Bösch, P. M.; Ciari, F.; Axhausen, K. W. (2015): Required Autononous Vehicle Fleet Sizes to Serve different Levels of Demand. Zürich.
Büttner, B.; Wulfhorst, G. (2016): The TUM Accessibility Atlas as a tool for fostering decision making process on sustainable mobility in the metropolitan region of Munich. In: 14th WTRC, Proceedings, Shanghai.
Cyganski, R. (2015): Autonome Fahrzeuge und autonomes Fahren aus Sicht der Nachfragemodellierung. In: Maurer, M.; Gerdes, J. C.; Lenz, B.; Winner, H. (Hrsg.): Autonomes Fahren. Heidelberg, 241-264.
Dangschat, J. S. (2017): Automatischer Verkehr – was kommt da auf uns zu? In: Zeitschrift für Politikwissenschaft 27 (4), 493-507.
Dangschat, J. S. (2020): Gesellschaftlicher Wandel, Raumbezug und Mobilität. In: Reutter, U.; Holz-Rau, C.; Albrecht, J.; Hülz, M. (Hrsg.): Wechselwirkungen von Mobilität und Raumentwicklung im Kontext gesellschaftlichen Wandels. Hannover, 32-75. = Forschungsberichte der ARL 14.
Dietmayer, K. (2015): Prädiktion von maschineller Wahrnehmungsleistung beim automatisierten Fahren. In: Maurer, M.; Gerdes, J. C.; Lenz, B.; Winner, H. (Hrsg.): Autonomes Fahren. Heidelberg, 419-438.
Döring, T.; Aigner-Walder, B. (2020): Neue Antriebstechnologien in Form von Elektrofahrzeugen unter Berücksichtigung des Nutzerverhaltens. In: Reutter, U.; Holz-Rau, C.; Albrecht, J.; Hülz, M. (Hrsg.): Wechselwirkungen von Mobilität und Raumentwicklung im Kontext gesellschaftlichen Wandels. Hannover, xx. = Forschungsberichte der ARL 14.
Dornier Consulting (2017): Autonomes Fahren – Erwartungen an die Mobilität der Zukunft. Berlin.
Färber, B. (2015): Kommunikationsprobleme zwischen autonomen Fahrzeugen und menschlichen Fahrern. In: Maurer, M.; Gerdes, J. C.; Lenz, B.; Winner, H. (Hrsg.): Autonomes Fahren. Heidelberg, 127-146.
Flämig, H. (2015): Autonome Fahrzeuge und autonomes Fahren in Bereichen des Gütertransports. In: Maurer, M.; Gerdes, J. C.; Lenz, B.; Winner, H. (Hrsg.): Autonomes Fahren. Heidelberg, 377-398.
Fraedrich, E.; Lenz, B. (2015a): Gesellschaftliche und individuelle Akzeptanz des autonomen Fahrens. In: Maurer, M.; Gerdes, J. C.; Lenz, B.; Winner, H. (Hrsg.): Autonomes Fahren. Heidelberg, 639-660.
Fraedrich, E.; Lenz, B. (2015b): Vom (Mit-)Fahren: autonomes Fahren und Autonutzung. In: Maurer, M.; Gerdes, J. C.; Lenz, B.; Winner, H. (Hrsg.): Autonomes Fahren. Heidelberg, 687-708.
Friedrich, B. (2015): Verkehrliche Wirkung autonomer Fahrzeuge. In: Maurer, M.; Gerdes, J. C.; Lenz, B.; Winner, H. (Hrsg.): Autonomes Fahren. Heidelberg, 331-350.
Friedrich, M.; Hartl, M. (2016): MEGAFON – Modellergebnisse geteilter autonomer Fahrzeugflotten des öffentlichen Nahverkehrs. Schlussbericht. Stuttgart.

Gerdes, J.; Thornton, C.; Thornton, S. M. (2015): Implementable Ethics for Autonomous Cars. In: Maurer, M.; Gerdes, J. C.; Lenz, B.; Winner, H. (Hrsg.): Autonomes Fahren. Heidelberg, 87-102.
Heinrichs, D. (2015): Autonomes Fahren und Stadtstruktur. In: Maurer, M.; Gerdes, J. C.; Lenz, B.; Winner, H. (Hrsg.): Autonomes Fahren. Heidelberg, 219-240.
Heymann, E.; Meister, J. (2017): Das „digitale Auto": Mehr Umsatz, mehr Konkurrenz, mehr Kooperation. Frankfurt am Main. = Deutschland-Monitor Digitale Ökonomie und struktureller Wandel Juni 2017.
Holz-Rau, C.; Scheiner, J. (2020): Raum und Verkehr – ein Feld komplexer Wirkungsbeziehungen. Können Interventionen in die gebaute Umwelt klimawirksame Verkehrsemissionen wirklich senken? In: Reutter, U.; Holz-Rau, C.; Albrecht, J.; Hülz, M. (Hrsg.): Wechselwirkungen von Mobilität und Raumentwicklung im Kontext gesellschaftlichen Wandels. Hannover, 76-101. = Forschungsberichte der ARL 14.
Laker, L. (2017): Street wars 2035: can cyclists and driverless cars ever co-exist. In: The Guardian, 14.06.2017.
Lin, P. (2015): Why Ethic Matters for Autonomous Cars. In: Maurer, M.; Gerdes, J. C.; Lenz, B.; Winner, H. (Hrsg.): Autonomes Fahren. Heidelberg, 69-86.
Lin, P. (2017): Give your car a conscience. Why driverless cars need morals. In: New Scientist, 04.01.2017.
Maurer, M.; Gerdes, J. C.; Lenz, B.; Winner, H. (Hrsg.) (2015): Autonomes Fahren – Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. Heidelberg.
McKinsey (2018): Autonomes Fahren verändert Autoindustrie und Städte. https://www.mckinsey.de/autonomes-fahren-verändert-autoindustrieundstaedte (15.12.2017).
Meyer, J.; Becker, H.; Bösch, P.; Axhausen, K. W. (2017): Autonomous Vehicles. The next Jumps in Accessibility. In: Research in Transportation Economics 62, 80-91.
Minx, E.; Dietrich, R. (2015): Autonomes Fahren – Wo wir heute stehen und was noch zu tun ist. Ladenburg.
Pavone, M. (2015): Autonomous Mobility-on-Demand Systems for Future Urban Mobility. In: Maurer, M.; Gerdes, J. C.; Lenz, B.; Winner, H. (Hrsg.): Autonomes Fahren. Heidelberg, 399-416.
Rannenberg, K. (2015): Erhebung und Nutzbarmachung zusätzlicher Daten – Möglichkeiten und Risiken. In: Maurer, M.; Gerdes, J. C.; Lenz, B.; Winner, H. (Hrsg.): Autonomes Fahren. Heidelberg, 515-538.
Reutter, U.; Wittowsky, D. (2020): Technologische Neuerungen und mögliche Folgen für Raum und Verkehr. In: Reutter, U.; Holz-Rau, C.; Albrecht, J.; Hülz, M. (Hrsg.): Wechselwirkungen von Mobilität und Raumentwicklung im Kontext gesellschaftlichen Wandels. Hannover, 196-218. = Forschungsberichte der ARL 14.
VDI – Verein Deutscher Ingenieure e.V.; VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (2019): Automatisiertes und autonomes Fahren. VDI-Handlungsempfehlung, Dezember 2019. Düsseldorf.
VDV – Die Verkehrsunternehmen (2015): Zukunftsszenarien autonomer Fahrzeuge – Chancen und Risiken für Verkehrsunternehmen. Positionspapier. Köln.
Wachenfeld, W.; Winner, H. (2015): Lernen autonome Fahrzeuge? In: Maurer, M.; Gerdes, J. C.; Lenz, B.; Winner, H. (Hrsg.): Autonomes Fahren. Heidelberg, 465-488.
Wachenfeld, W.; Winner, H.; Gerdes, C.; Lenz, B.; Maurer, M.; Beiker, S.; Fraedrich, E.; Winkle, T. (2015): Use-Cases des autonomen Fahrens. In: Maurer, M.; Gerdes, J. C.; Lenz, B.; Winner, H. (Hrsg.): Autonomes Fahren. Heidelberg, 9-37.
Wagner, P. (2015): Steuerung und Management in einem Verkehrssystem mit autonomen Fahrzeugen. In: Maurer, M.; Gerdes, J. C.; Lenz, B.; Winner, H. (Hrsg.): Autonomes Fahren. Heidelberg, 313-330.
Wehner, S. (2017): Autonomes Fahren – Auswirkungen auf Verkehrs-, Stadt- und Infrastrukturentwicklung. Wuppertal.
Wieler, J. (2017): So werden Sie gefahren. In: ADAC motorwelt 5/17, 20-24.

Autor

Klaus J. Beckmann (**1948*), *Stadt- und Verkehrswissenschaftler, Geschäftsführer „KJB.Kom Prof. Dr. Klaus J. Beckmann – Kommunalforschung, Beratung, Moderation und Kommunikation"* (*Berlin*), *Wissenschaftlicher Direktor und Geschäftsführer des Deutschen Instituts für Urbanistik Difu 2006–2013* (*Berlin/Köln*), *Institutsleiter und Lehrstuhlinhaber „Stadtbauwesen und Stadtverkehr" 1996–2006* (*RWTH Aachen*), *Stadtbaurat der Stadt Braunschweig 1990–1996, Professor für „Kommunale Infrastrukturen" 1985–1990* (*Universität Karlsruhe*).